بررسی میکروساختار و خواص سایشی پوشش کامپوزیتی Al/Al_3Ti ایجاد شده به کمک الکترود توپودری*

افسانه انصاری[۱] امیرحسین کوکبی[۲] سید حمیدرضا مداح حسینی[۳]

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از فرایند جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکترود تنگستن (تیگ) و الکترود توپودری، پوشش کامپوزیتی مقاوم به سایش، روی آلومینیم خالص تجاری ایجاد شد. الکترودهای توپودری، به کمک دستگاه کشش سیم و نوارهای آلومینیمی و مخلوط پودرهای آلومینیم و تیتانیم تولید شدند. ریزساختار و فازهای موجود در پوشش نیز توسط آزمون‌های XRD، متالوگرافی و SEM مجهز به EDS بررسی شد. آزمون‌های ریزسختی‌سنجی و سایش انجام شد. بیشترین سختی حاصل (۳۰۰ ویکرز) حدود ۱۳ برابر فلز پایه بود. نتایج نشان داد که پوشش، شامل فازهای آلومینیم α، تیتانیم α و همچنین بین فلزی Al_3Ti بوده و حضور Al_3Ti منجر به افزایش سختی و مقاومت به سایش می‌شود.

واژه‌های کلیدی پوشش کامپوزیتی؛ مقاومت به سایش؛ جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکترود تنگستن؛ الکترود توپودری.

Study of Microstructure and Wear Behavior of in-situ Al/Al_3Ti Composite Coating on Commercial Pure Al Produced by Aluminum Cored Wires

A. Ansari A. H. Kokabi H.R. Madaah Hoseini

Abstract

In this study, GTAW process and cored wires were used to coat Al/Al_3Ti wear resistant composite on a commercial pure Al substrate. Wire drawing process was utilized to produce the cored wires from aluminum strips and a mixture of titanium and aluminum powders. The microstructures and the present phases were investigated by metallographic, SEM equipped with EDS and XRD analysis. Moreover, the hardness and wear resistance of the samples were evaluated. A maximum microhardness value of about 300HV was measured which is 13 times higher than the hardness of the substrate material. The results showed that the coating was composed of Al, Ti as well as Al_3Ti. The presence of Al3Ti led to increase in the wear resistance of the coating.

Key Words Composite Coating; Wear Resistance; GTAW; Cored Wire.

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۹/۱۸ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۱۰/۱٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف.

مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، ظاهر و ویژگی‌های ساخت خوب، در صنایع هوافضا، اتومبیل، ساختمان، بسته بندی و ماشین‌های الکتریکی اهمیت یافته‌اند. ولی کاربرد آن‌ها به دلیل مقاومت به سایش و استحکام تسلیم پائین محدود شده است. بنابراین با اصلاحاتی در ریزساختار یا ترکیب شیمیایی لایه‌های سطح قطعات، می‌توان مقاومت به سایش آن را افزایش داد. یکی از این اصلاحات ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی روی سطح است[1,2]. به منظور رسیدن به مقاومت سایشی عالی، عملیات سطحی بسیاری مانند آندایز کردن، آبکاری و رسوب دهی فیزیکی بخار به کار برده می‌شود؛ اما این لایه‌های سطحی خیلی نازک بوده و نمی‌توانند بار اعمالی شدید را تحمل کنند و به راحتی با تغییر شکل زیرلایه آلومینیمی می‌شکنند. بنابراین به دست آوردن پوشش ضخیم سخت روی سطح آلومینیم ضروری است[2]. روش‌هایی نظیر لیزر و پرتو الکترونی نیز با ذوب سطحی می‌توانند لایه های آلیاژی یا کامپوزیت سطحی ضخیم با خواص مطلوب ایجاد کنند، اما به دلیل هزینه زیاد و در دسترس نبودن چندان مطلوب نمی باشند[3].

امروزه از فرایند جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکترود تنگستن با کمک الکترود توپودری جهت ایجاد لایه‌های آلیاژی و کامپوزیتی سطحی استفاده می‌شود. این روش محدودیت‌های مذکور برای روش‌های دیگر را ندارد[3,4].

در طول دهه اخیر، اکثر تحقیقات روی کامپوزیت‌های زمینه Al با تقویت‌کننده‌های سرامیکی متمرکز شده است. در فرایند ساخت این کامپوزیت‌ها محدودیت‌هایی نظیر اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی بین زمینه آلومینیم و تقویت‌کننده‌های سرامیکی و همچنین تردی زیاد سرامیک‌ها وجود دارد. ترکیبات بین‌فلزی آلومینیمی مانند Al_3Ti، ضریب انبساط حرارتی نزدیک به Al دارند و در مقایسه با سرامیک‌ها تردی کمتری دارند. همچنین این ترکیبات دارای چگالی کم و نقطه ذوب بالا، مقاومت به اکسایش، سختی زیاد و مدول یانگ بالا هستند، در نتیجه می-توانند انتخاب‌های مناسب تری نسبت به سرامیک‌ها باشند[5,7]. در پژوهشی پوشش کامپوزیتی Al/Al3Ti به روش نفوذی ساخته شده است، به این صورت که شبکه‌ای ساخته شده از میله‌های تیتانیمی روی یک قطعه آلومینیمی قرار داده شده و سپس این مجموعه به مدت ۲۰ دقیقه داخل کوره تحت دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. پس از ۲۰ دقیقه، همه تیتانیم تبدیل به Al_3Ti شده است. با افزایش زمان ماندگاری در کوره و در نتیجه افزایش درصد Al_3Ti، ضریب اصطکاک کاهش یافته است[8]. در تحقیقی، با استفاده از پرتو لیزر، پوشش بین فلزی مقاوم به سایش Al_3Ti را روی سطح آلومینیم رسوب دهی کردند و با کاهش میزان رقت و افزایش درصد Al_3Ti مقاومت به سایش افزایش یافت[9].

در این پژوهش از روش جوشکاری تحت پوشش گازهای محافظ با الکترود تنگستن به کمک الکترود توپودری برای ایجاد کامپوزیت سطحی بر روی آلومینیم خالص تجاری استفاده شد. مفتول مورد استفاده از جنس آلومینیم بوده و با هدف تشکیل فاز بین فلزی آلومیناید تیتانیم، مخلوط پودر آلومینیم و ٤٠٪ وزنی تیتانیم داخل مفتول اضافه شد. ریز ساختار و ترکیب لایه‌های ایجاد شده به روش‌های SEM، میکروسکوپ نوری و XRD بررسی شد. همچنین سختی و خواص سایشی لایه‌های سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق آلومینیم خالص تجاری با ضخامت ٤ میلی متر و سطح ٦٠ در ٨٠ میلی متر به عنوان زیرلایه استفاده شد. قبل از فرایند پوشش‌دهی،

برای از بین بردن اکسیدهای سطحی، هرگونه چربی و ذرات دیگر، زیرلایه سنباده زده شده و توسط استن به طور کامل تمیز گردید. به منظور ایجاد لایه سطحی الکترودهای توپودری به کاربرده شد. به منظور ساخت این الکترودها، ورق آلومینیم ۱۰۵۰ با ضخامت ۰/۵ میلی متر و عرض ۱۰ میلی متر را از قالب‌های دستگاه کشش سیم با قطرهای ۵، ٤/۵ و ٤/۱ میلی‌متر عبور کرده تا سطح مقطع ورق ابتدا به حالت U و سپس به حالت O درآید. در حین این مراحل مخلوط پودر آلومینیم و تیتانیم داخل ورق ریخته شد. خلوص آلومینیم بیش از ۹۹ درصد و خلوص تیتانیم بیش از ۹۸ درصد بود و اندازه ذرات پودر کمتر از ۱۰۰ میکرون بود. در این تحقیق مخلوط ٤۰ درصد وزنی تیتانیم بررسی شد که سختی و مقاومت به سایش را به میزان قابل توجهی افزایش داد، اگرچه درصدهای کمتر از ٤۰ درصد وزنی در حال بررسی است که در مقالات دیگر منتشر می‌شود. برای مخلوط کردن پودرها از دستگاه مخلوط کن توربولا(Turbula mixer) استفاده شد. نکته قابل ذکر این است که قبل از ساخت الکترود، ورق آلومینیم مورد استفاده به مدت ۱ ساعت در دمای ٤۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شد تا انعطاف‌پذیری لازم را به دست آورده و ضمن عملیات شکل‌دهی پاره نشود. شکل(۱) مراحل ساخت الکترود توپودری را نشان می-دهد.

عملیات پوشش دهی با استفاده از فرآیند جوشکاری تحت گاز محافظ و الکترود تنگستن و الکترودهای توپودری تهیه شده انجام شد. الکترود مصرف نشدنی تنگستن-۲٪ توریم به قطر ۲/٤ میلی‌متر جهت ایجاد قوس به کاربرده شد. گاز محافظ مورد استفاده، گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ بود. شدت جریان، سرعت جوشکاری و میزان دمش گاز به ترتیب برابر با ۱۱۰ آمپر، ۱/۱۱ میلی متر بر ثانیه و ١٤ لیتر بر دقیقه انتخاب گردید. در این پژوهش از جریان متناوب استفاده شد. بررسی ریزساختار به وجود آمده به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. فازهای موجود نیز با استفاده از آنالیز XRD شناسایی شدند. همچنین میکروسختی سنجی از فازهای مختلف با استفاده از روش ویکرز و اعمال وزنه ۱۰ گرمی انجام شد. مقاومت به سایش با استفاده از تست سایش پین روی دیسک طبق استاندارد ASTM-G99-04 بررسی گردید. در این تست پین از جنس فولاد بلبرینگ۵۲۱۰۰ با سختی ٦۰ راکول سی و دیسک از جنس پوشش ایجاد شده بر زیرلایه بود. پین با قطر ۵ میلی‌متر، طول ۵۰ میلی‌متر و انحنای سر پین ۱۰میلی‌متر و به روش متالورژی پودر ساخته شده بود. تست سایش در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه و نیروی اعمالی ۳٦ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد.

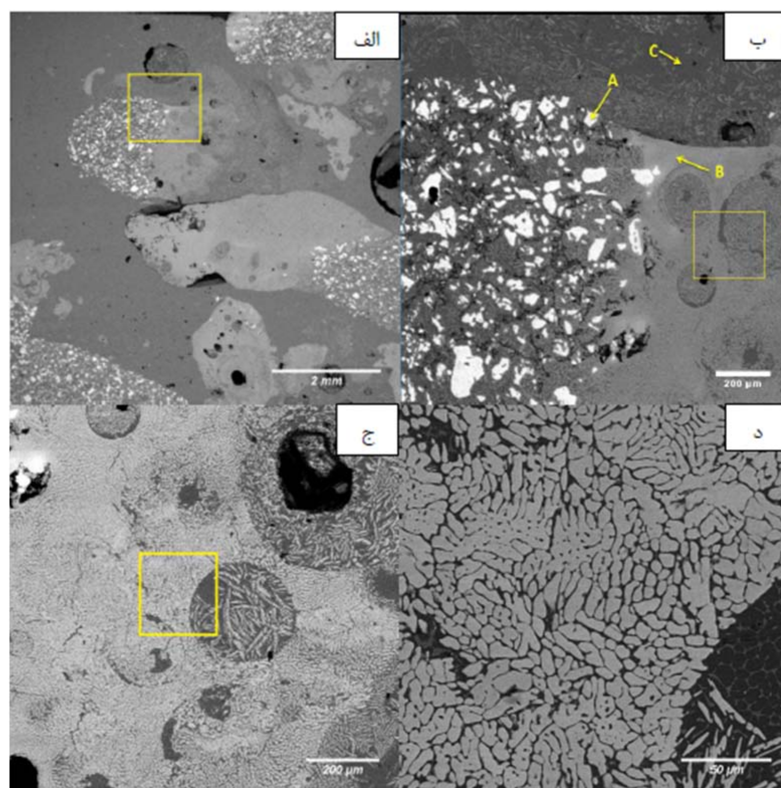
نتایج و بحث

بررسی ریزساختار. شکل(۲) ریزساختار پوشش ایجاد شده را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. در بخشی از ساختار ملاحظه می‌شود که جزایر سفید رنگ در زمینه ای سیاه قرار دارند و اطراف آنها فازی خاکستری روشن دیده می شود. در قسمت‌های دیگر از ساختار، فاز خاکستری روشن به صورت دندریتی ظاهر شده است. با توجه به آنالیز EDS از فازهای سفید، خاکستری روشن و خاکستری تیره که در شکل(۳) نشان داده شده است، می‌توان گفت فازهای سفید، تیتانیم واکنش نداده با آلومینیم می‌باشد که با وجود محافظت توسط گاز محافظ، مقداری نیتروژن از هوا جذب کرده است. فازهای خاکستری روشن، Al_3Ti و فازهای خاکستری تیره، آلومینیم هستند. به دلیل دقیق نبودن آنالیز EDS، آزمون پراش پرتو ایکس روی نمونه انجام شد. در شکل(٤) الگوی پراش پرتو ایکس نشان داده شده است و تنها سه فاز آلومینیم α، بین فلزی Al_3Ti و درصد کمی تیتانیم α شناسایی شد. بنابراین ساختار شامل زمینه‌ای از آلومینیم است که در برخی نواحی فاز بین فلزی Al_3Ti به صورت دندریتی ایجاد شده است. این بین فلزی ها نتیجه واکنش آلومینیم موجود در زیرلایه و همچنین الکترود و پودر

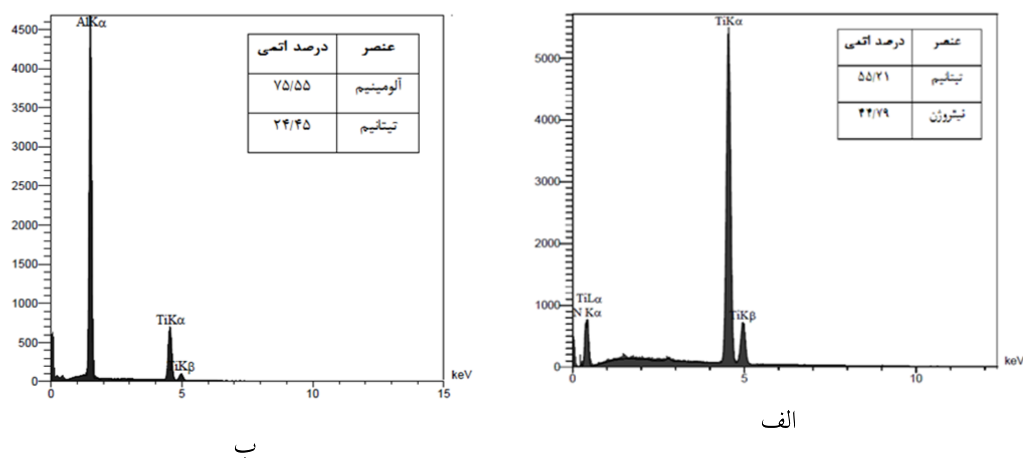
تیتانیم موجود در الکترود توپودری می‌باشد. همچنین در برخی نواحی مشاهده می‌شود که تیتانیم با آلومینیم به طور کامل واکنش نداده و اطراف آن فاز بین فلزی دیده می‌شود. با توجه به تجزیه شیمیایی EDS، ممکن است در ساختار نیترید تیتانیم وجود داشته باشد، اما به دلیل درصد پایین آن، در الگوی پراش ایکس مشخص نشده است. در تصویر با بزرگنمایی کم (شکل۲–الف)، جزایری از بین فلزی و تیتانیم در زمینه آلومینیم مشاهده می‌شود که نشان دهنده عدم یکنواختی ساختار است.



شکل۱ مراحل ساخت الکترود توپودری

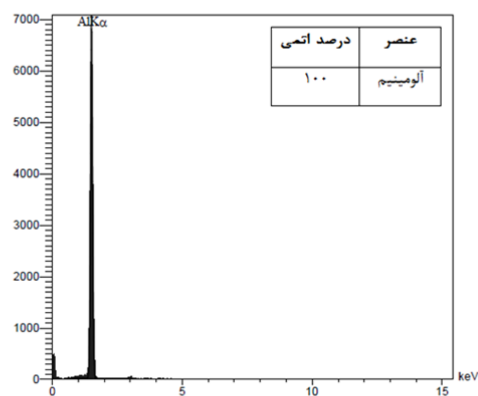


شکل۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه پوشش داده شده؛ الف) زمینه آلومینیم و جزایر شامل تیتانیم و بین فلزی Al_3Ti و دندریت‌های Al_3Ti، ب) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل الف، ج) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل ب، د) تصویر بزرگنمایی شده قسمت مشخص شده در شکل ج(دندریت‌های Al_3Ti).



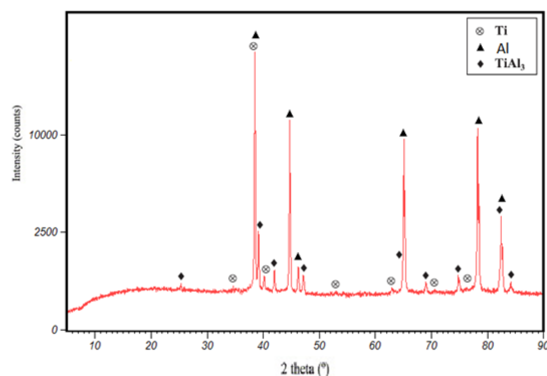
الف

ب



ج

شکل۳ طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس(EDS) الف)مربوط به نقطهA، ب)نقطهB، ج) نقطهC مشخص شده در شکل ۲-ب.

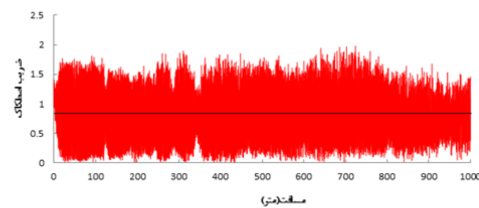


شکل٤ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه پوشش داده شده

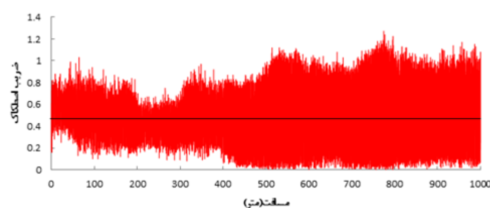
بررسی مقاومت به سایش. آزمون سایش روی نمونه پوشش داده شده و فلز پایه آلومینیمی انجام شد. شکل‌های (۵ و ٦) نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت را برای نمونه پوشش داده شده و فلز پایه آلومینیمی نشان می دهند. ضریب اصطکاک نمونه پوشش داده شده به طور میانگین ۰/٤۷ و فلز پایه

آلومینیمی ۰/۸ می‌باشد. بنابراین با ایجاد پوشش توسط جوشکاری، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. همانطور که در بخش مقدمه ذکر شد، پوشش کامپوزیتی ساخته شده به روش نفوزی دارای میانگین ضریب اصطکاک ۰/٤٥ برای سایش تحت نیروی ۱۰ نیوتن است و به ضریب اصطکاک نمونه پوشش داده شده به کمک الکترود توپودری نزدیک است[8].

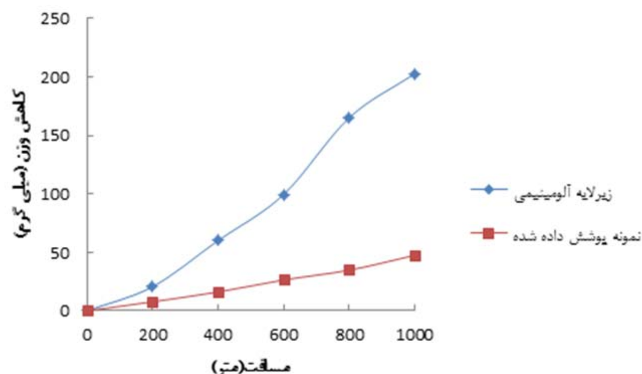
نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت در شکل(۷) آورده شده است و ملاحظه می‌شود که نمونه پوشش دار کاهش وزن کمتری نسبت به آلومینیم زیرلایه داشته است. به طوری که بعد از لغزش ۱۰۰۰ متر کاهش وزن نمونه پوشش دار ٤٧/٦ میلی‌گرم و فلز پایه آلومینیمی ۲۰۲/۸ میلی‌گرم بوده است. همچنین ملاحظه می‌گردد با افزایش مسافت کاهش وزن فلز پایه آلومینیمی نسبت به نمونه پوشش‌دار بیشتر افزایش یافته است، به عبارت دیگر نرخ کاهش وزن یا نرخ سایش در زیرلایه آلومینیمی بیشتر از نمونه پوشش داده شده است. این افزایش مقاومت به سایش به طور مستقیم مربوط به وجود فازهای سخت در نمونه پوشش دار می باشد. شکل (۸) سختی فازهای مختلف را نشان می دهد. فازهای بین فلزی دارای سختی ۳۰۰ ویکرز می‌باشند. از فاز تیتانیم نیز سختی گرفته شده و برابر با ۱۷۵ بوده و زمینه آلومینیمی دارای سختی ٤۰ ویکرز می‌باشد؛ زیرا با توجه به شکل(۸)، اثر فرورفتگی سختی سنج علاوه بر آلومینیم روی برخی بین فلزی‌ها قرار گرفته است. سختی زیرلایه یا به عبارتی آلومینیم خالص تجاری برابر با ۲۳ ویکرز است و بنابراین سختی در نمونه پوشش‌دهی شده تا ۱۳ برابر افزایش یافته است.



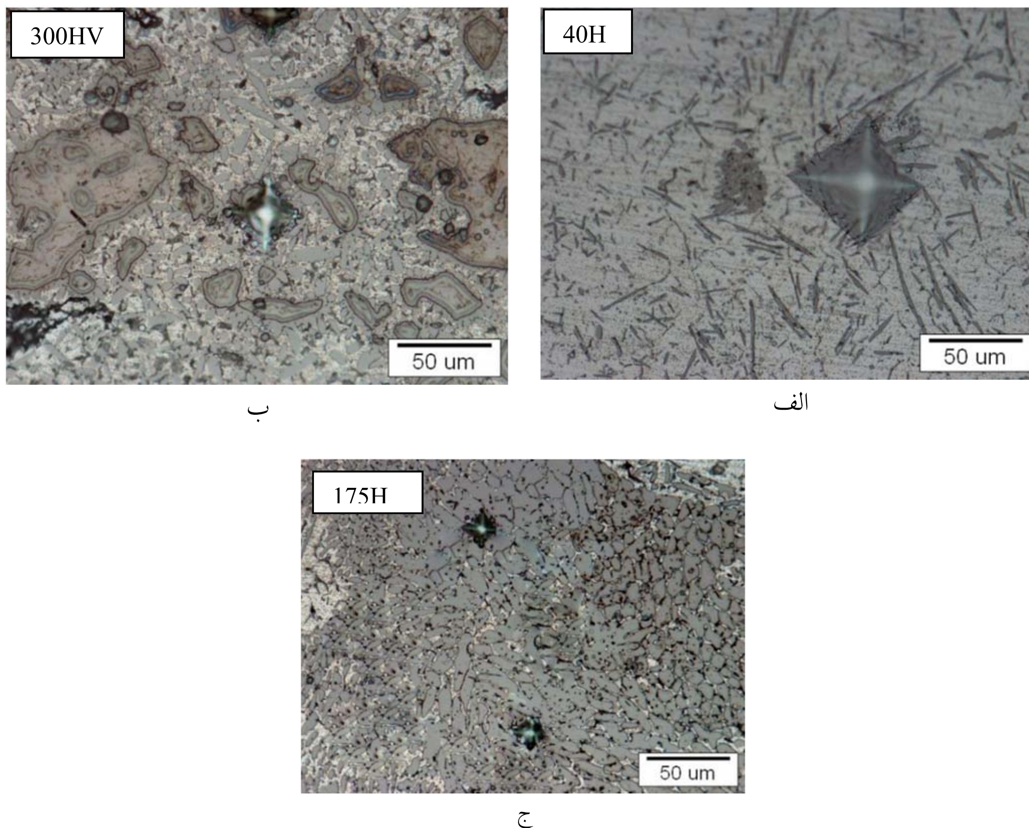
شکل٥ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت زیرلایه آلومینیمی



شکل٦ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه پوشش دهی شده.



شکل۷ نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت



شکل۸ میکروسختی فازهای مختلف.الف) زمینه آلومینیمی ب)فاز تیتانیم ج)دندریت‌های بین فلزیAl_3Ti.

نتیجه گیری

۱- با انجام عملیات پوشش‌دهی با استفاده از روش جوشکاری تحت پوشش گاز محافظ الکترود تنگستن و الکترود توپودری آلومینیمی حاوی پودر آلومینیم-۴۰٪ تیتانیم، ساختاری شامل فازهای آلومینیم، تیتانیم و بین فلزی آلومیناید تیتانیم (Al_3Ti) به صورت درجا تشکیل می‌شود.

۲- سختی فاز بین فلزی برابر ۳۰۰ ویکرز است و حدود ۱۳ برابر سختی زیرلایه آلومینیمی (۲۳ ویکرز) می‌باشد.

۳- وجود فازهای سخت بین فلزی در زمینه آلومینیم منجر به افزایش مقاومت به سایش نمونه پوشش دهی شده نسبت به زیرلایه آلومینیمی می‌شود؛ به طوری که بعد از لغزش ۱۰۰۰ متر کاهش وزن نمونه پوشش دار ٤۷/٦ میلی‌گرم و برای فلز پایه آلومینیمی ۲۰۲/۸ میلی‌گرم است.

٤- ضریب اصطکاک نمونه پوشش‌دهی شده برابر با ۰/٤۷ است در حالی که ضریب اصطکاک زیرلایه آلومینیمی ۰/۸ می‌باشد.

مراجع

1. Shrestha, S., Dunn, B.D., and Dong, H., (Ed.), "Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys", Woodhead Publishing Limited, pp. 40-57,(2010).

2. Xu, J., Liu, W., Kan, Y., Zhong, M., "Microstructure and Wear Properties of Laser Cladding Ti–Al–Fe–B Coatings on AA2024 Aluminum Alloy", Materials and Design, vol. 27, pp. 405–410, (2006).

3. Yang, R., Liu, Z., Yang, G., Wang, Y., "Study of In-situ Synthesis TiCp/Ti Composite Coating on Alloy Ti6Al4 V", *TIG Cladding*, vol. 36, pp. 349 – 354, (2012).

4. Monfared, A., Kokabi, A.H., Asgari, S., "Microstructural Studies and Wear Assessments of Ti/TiC Surface Composite Coatings on Commercial pure Ti Produced by Titanium Cored Wires and TIG Process", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 137, pp. 959-966, (2013).

5. Smith, A., "Discontinuous Reinforcements for Metal-Matrix Composites", handbook, Composites, ASM, vol. 21, pp.51, (1990).

6. Nofar, M., Madaah Hosseini, H.R., Kolagar-Daroonkolaie, N., "Fabrication of High Wear Resistant Al/Al3Ti Metal Matrix Composite by in Situ Hot Press Method", *Materials and Design*., vol. 30, pp.280–286, (2009).

7. Abbasi Chianeha, V., Madaah Hosseini, H.R., Nofar, M., "Micro Structural Features and Mechanical Properties of Al–Al_3Ti Composite Fabricated by in-Situ Powder Metallurgy Route", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 473, pp.127–132, (2009).

8. Niu, L.B., Zhang, J.M., YANG, X.l., "In-Situ Synthesis of Al_3Ti Particles Reinforced Al-based Composite Coating", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, pp.1387−1392, (2012).

9. Uenishi K., Kobayashi K. F. "Formation of Surface Layer Based on Al_3Ti on Aluminum by Laser Cladding and its Compatibility with Ceramics", *Intermetallics*, vol.7, pp. 553-559, (1999).